

歯科理工学の基礎と臨床(最終講義要旨) : ワックスのレオロジーと鑄造体の適合

著者	川上 道夫
雑誌名	東北大学歯学雑誌
巻	7
号	1
ページ	1a-12a
発行年	1988-06-30
URL	http://hdl.handle.net/10097/31291

歯科理工学の基礎と臨床
—— ワックスのレオロジーと
鑄造体の適合 ——

最終講義要旨

歯学部歯科理工学教室

東北大学名誉教授 川 上 道 夫

昭和 63 年 6 月 30 日
東北大学歯学会発行

歯科理工学の基礎と臨床

—— ワックスのレオロジーと 鑄造体の適合 ——

最終講義要旨

歯学部歯科理工学教室

東北大学名誉教授 川 上 道 夫

はじめに

今日は、上にあげた題目を付けたが、あまり範囲を拡げると焦点がぼやけるので、鑄造用ワックスのレオロジー的性質が鑄造体の適合にどうかかわるかに限って話をしたい。

レオロジーは、物体の変形と流動の学問であるから、収縮とか変形とかという言葉が話すが、ここにおいての皆様は収縮、変形という言葉にアレルギーを起されると思うので、今日は歯科の事は全く知らない、教養部の学生になったつもりで聞いて頂きたい。

ワックスは古くから使われて来た材料であるが、今まで収縮が大きくて変形しやすい、取扱いが面倒で使いにくい材料であるといわれて来た。歯科理工学者の中には、「ワックスを使っている限り歯科鑄造に進展はない」と云う人もいたくらいである。

現在新しい製品が次々に売り出されているが、臨床家の眼は確かで、不合理な製品は無くなるか、組成が全く変わってしまうことが多い。その中でワックスは今世紀の初めから一貫して使われている。若しワックスがそれ程悪い材料であれば、例えば型毎埋没という方法を採用してもよい。この方法を採用すれば、ワックスは単にスペーサーになるだけであるから、その変形はあまり問題にならない筈である。しかし、それで常にうまく行くとは限らない。

ワックスには何か価値のある性質があるのではないかと前から考えていた。

そこで本学に赴任してから、本格的にワックスの研究を初めることにした。この研究は歯科理工学教室の全員だけでなく、補綴の先生にも助けて頂いたものである。またこの話には「例えば」とか「仮に」とか云

う言葉をつけた数値が出るが、これは計算の都合上のことで、私自身、その値が最もよいと考えているわけではないことに十分注意して頂きたい。

1. パラフィンの変態と熱収縮

ワックスの主成分はパラフィンである。パラフィンは得体の知れない材料のように思っていたが、X線回折によると、大部分（ほぼ8割）が結晶し、残りが非

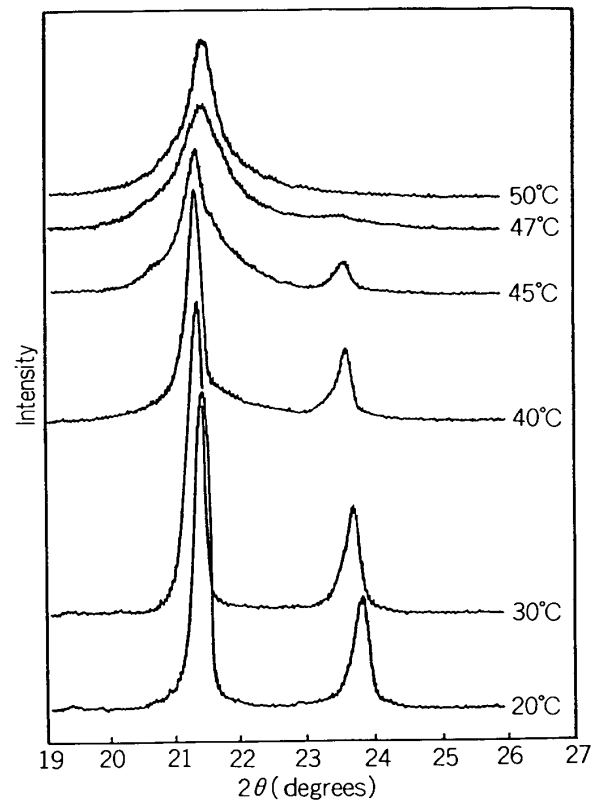


図1 パラフィン (m.p.62°C) のX線回折の温度依存性

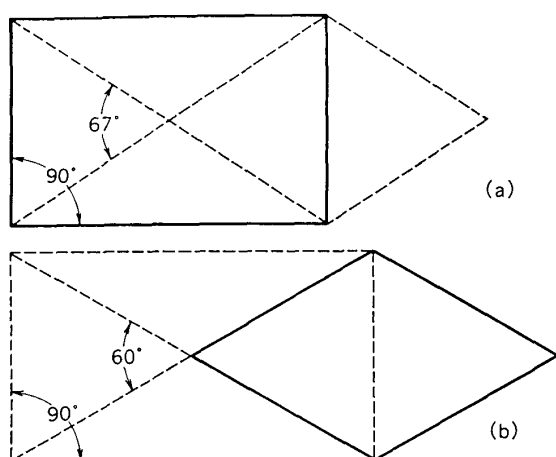


図2 パラフィン結晶格子の断面
a: 低温型の斜方晶系 b: 高温型の六方晶系

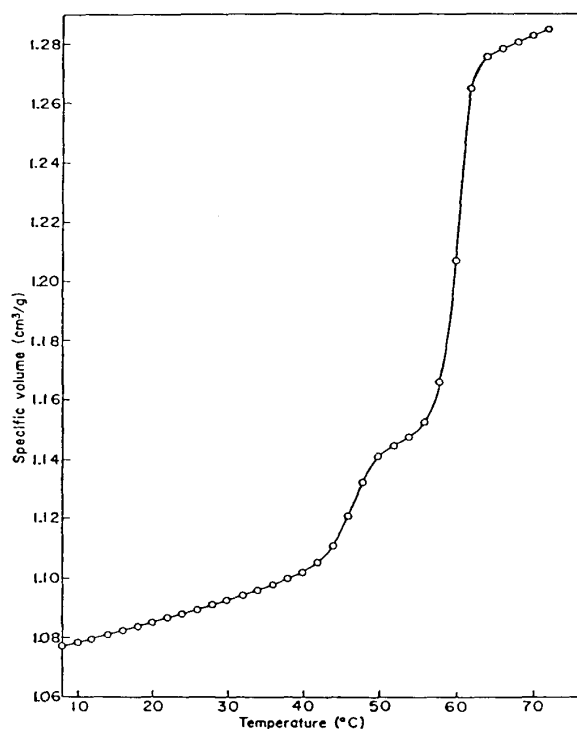


図3 パラフィンの比容積変化

結晶質になって結晶同士をつなぎ止めるという構造になっている。

また図1のX線回折図からわかるように、パラフィンには融点下約10℃～20℃で変態がおこり、低温では図2(a)のような斜方晶であるが、温度が高くなるに従って斜方晶特有のピークが消えて図2(b)のように一つの軸が伸びて六方晶になる。

ディラトメーターで熱膨張による比容積の変化を測ると、図3のように、低温のうちはゆっくり膨張する

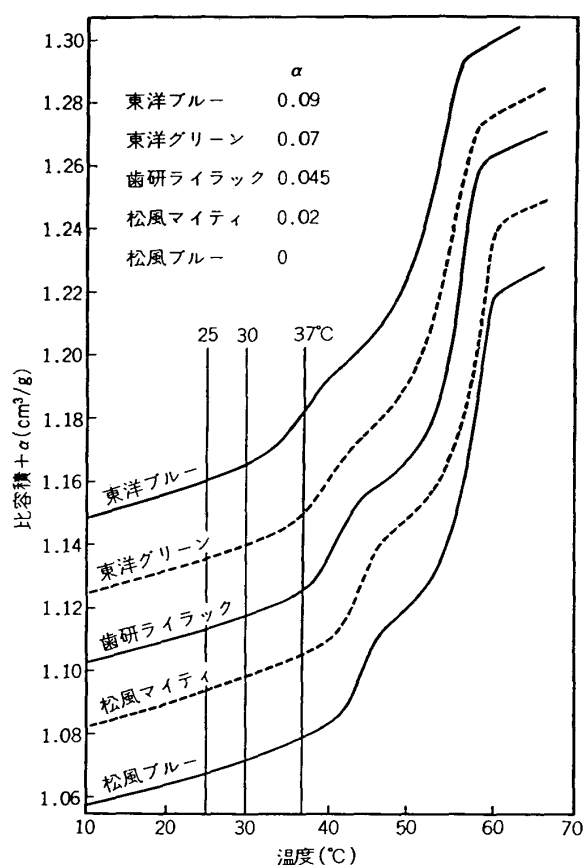


図4 インレーワックスの比容積変化(直接法用)

が、結晶転移が始まると急に膨張し、変態が終了すると六方晶として膨張し、その後融解に伴う急膨張が現れる。

これは時間をかけて平衡状態で測った曲線である。ワックスの膨張を測られた方は、この曲線とは違うと云われるかもしれないが、それはワックスには体積粘弾性による膨張の遅れが出て、加熱速度によっては多少曲線の形がくずれるからである。この図は後で考えるのに便利のように比容積で表してあるが、ある基準温度からの熱膨張収縮を知りたいときには、簡単な比例計算で求めることができる。

2. インレーワックスの熱膨張と物性変化

インレーワックスになると、カルナウバワックス、ビーズワックス、ダンマルなどが入るので、図4のように比容積の変化は多少違って来るが、パラフィンの変態の影響は強く残っている。この図は見易くするために、 α を加えて少しずつずらしてあるので、比容積を知りたい時には α を差引けばよい。この図の中でそれぞれ特徴のある東洋ブルーと松風マイティに注目し

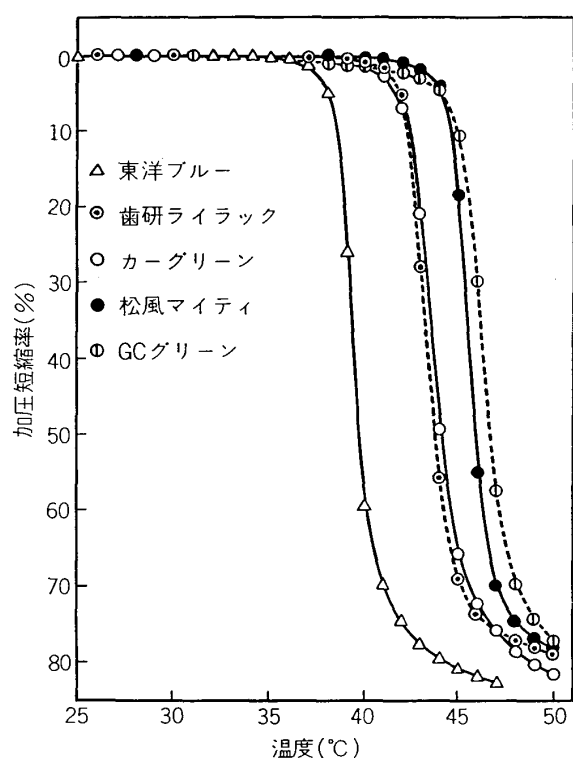


図5 加圧短縮率の温度依存性（直接法用）

て頂きたい。両者とも変態に伴う急膨張は表れているが、その温度が違っている。ただし、東洋ブルーはその後組成が変わって、他の材料と似たものになってしまったのは残念である。

図5はADAS（American Dental Association Specification）やJISの短縮率の測定法をモディファ

イして行なった測定である。つまり、直径10 mm、高さ6 mmの試験片に荷重3 kgfをかけ、恒温槽中で一定の昇温速度で温度を上げて、その短縮率を測ったものである。

融点の低い東洋ブルーは35°Cから短縮しはじめるが、比容積の図で見ると、この温度から変態がはじまっている。融点の高い松風マイティでは、42~3°Cから短縮しはじめるが、比容積でもこの温度から変態がはじまっている。

図5で短縮率5%、つまり断面積が $0.5^2 \pi \text{cm}^2 / 0.95 = 0.83 \text{cm}^2$ になったとき、試験片にかかる応力は $3 \text{kgf} / 0.83 \text{cm}^2 = 3.6 \text{kgf/cm}^2$ となるが、この温度から25°Cまでの収縮を計算すると、東洋ブルーでは0.7%、松風マイティでは1.0%となる。

短縮率が75%になった時、試験片の断面積は $0.5^2 \pi \text{cm}^2 / 0.25 = 3.14 \text{cm}^2$ になるから、圧縮応力は $3 \text{kgf} / 3.14 \text{cm}^2 = 0.96 \text{kgf/cm}^2$ となるが、この時の温度は東洋ブルーで42°C、松風マイティで48.3°Cであり、その温度から25°Cまでの収縮は、東洋ブルーで1.1%、松風マイティで1.5%になる。このことから、ワックス圧接時の圧縮応力、いいかえれば内圧が小さいと収縮が大きくなることと、圧縮応力を同じにした時には、融点の高いワックスの方が収縮が大きくなることがわかる。

表1は直接法用ワックスの物性を示したものである。その5列目は、ADASやJISの測定法による25°Cから37°Cまでの膨張であるが、図4からわかるように

表1 強熱残分、熱膨張率、加圧短縮率（直接法用）

品 名	製造番号	強熱残分 (%)	熱膨張率 ¹⁾ (%)			加圧短縮率 (%)		
			30°C	37°C	T ²⁾ °C	37°C	40°C	45°C
東洋ブルー	5093	0.02	0.15	0.60	0.96	11	73	85
東洋グリーン	5093	0.02	0.14	0.43		0.6	11	79
歯研ライラック	B09D22	0.02	0.13	0.36	1.24	0.5	5.5	78
松風マイティ	047726	0.02	0.12	0.34	1.36	0.6	1.4	77
松風ブルー	057726	0.05	0.15	0.36		0.4	1.0	71
カーグリーン	70705	0.04	0.13	0.37	1.19	0.8	4.7	77
カーマルチカラー	70207	0.03	0.13	0.38		0.7	4.0	76
GCグリーン	DB14	0.01	0.14	0.36	1.24	0.6	2.0	72
アッシュブルー		0.06	0.11	0.33		0.2	1.6	74
JIS		0.1 以下	0.2 以下	0.6 以下		1.0 以下	20 以下	70 以上 90 以下

¹⁾ 基準温度を25°Cとし、それぞれ30°C、36°C、T°Cまでの線膨張率

²⁾ 加圧短縮率が50%（著者らの方法による）を示す温度

表2 強熱残分, 熱膨張率, 加圧短縮率 (間接法用)

品 名	製造番号	強熱残分 (%)	熱膨張率 ¹⁾ (%)			加圧短縮率 (%)		
			30℃	37℃	T ²⁾ ℃	30℃	40℃	45℃
東洋バイオレット	5093	0.03	0.16	0.78	0.95	0.4	84	87
カーブルー	70824	0.05	0.14	0.53	0.98	0.4	70	85
GC バイオレット	PB16	0.01	0.15	0.55		0.4	76	86
GC ホワイト	JR26	0.03	0.13	0.46		0.2	44	82
歯研オレンジ	B04A22	0.03	0.13	0.37	1.23	0.4	56	77
カーアイボリー	60601	0.04	0.14	0.53		0.2	68	74
GC ブルー	DY16	0.04	0.15	0.48	1.16	0.4	42	83
松風レッド	037738	0.06	0.14	0.38		0.1	52	86
松風カラー	077505	0.06	0.12	0.34	1.12	0.2	3.2	77
JIS		0.1 以下				1.0 以下	50 以上	70 以上 90 以下

¹⁾ 基準温度を 25℃ とし, それぞれ 30℃, 36℃, T℃ までの線膨張率

²⁾ 加圧短縮率が 50% (著者らの方法による) を示す温度

東洋ブルーのように変態温度の低いものは, 変態中の急膨張の一部を計り込んでしまうために, 膨張が大きいとされる。次の 6 列目の収縮は, ワックスが同じかたさになった温度, つまり短縮率 50% (圧縮応力: $3 \text{ kgf}/0.5^2 \pi \times 2 \text{ cm}^2 = 1.9 \text{ kg}/\text{cm}^2$) になった温度から 25℃ までの収縮率である。5 列目と 6 列目を比べると, ADAS や JIS の方法で膨張の小さい材料は, 実際の膨張が大きいことがわかる。

ADAS では, 直接法用のワックスについて, 25℃ から 37℃ までの膨張が 0.6% 以下でなければならないと規定している。米国では鑄造精度の検定に MOD タイプの鑄造体が広く使われているようである。その場合には, 恐らく ADAS の方法で膨張の小さいワックスを使った方が, 適合のよい鑄造体ができる筈である。そして人はワックスの収縮が小さかったから適合がよかったと判定するだろう。しかし, 適合したのは実はワックスの収縮が大きかったためであると考えた方が素直である。その理由については, 後で詳しく述べるつもりである。表 2 は間接法用ワックスの物性値である。

3. パラフィンの応力緩和

全部鑄造冠のような外側性のパタンの場合には, パタン形成後, 歯型につけたまま長時間放置するとパタンの収縮が小さくなる。これはワックスが応力緩和するためである。

その実態を把握するために, 先ずワックスの主成分

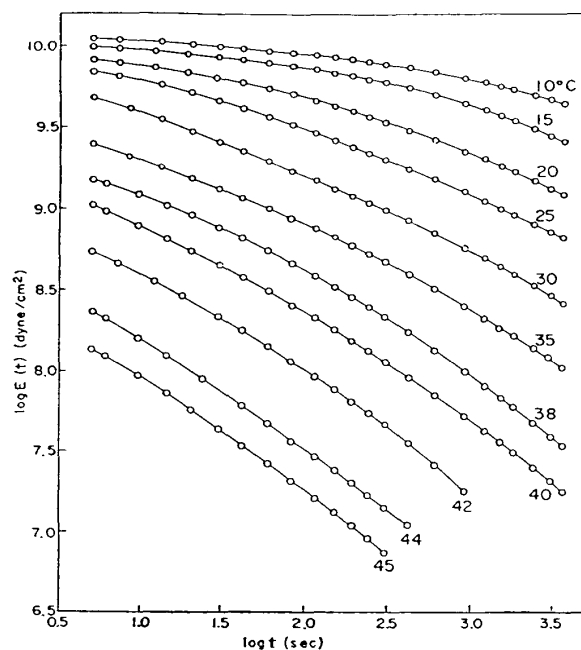


図6 パラフィンの応力緩和の温度依存性

であるパラフィンの応力緩和を測定した。パラフィンで短冊型の試験片を作って, 材料試験機に取り付け, 水中で温度を一定にして 0.2% の一定の引張ひずみを与えたままにしておいて, 発生する応力を時間を追って測定した結果が図 6 である。この両軸は, 後にアナログで考える時のことを考慮して, 横軸には時間 t 秒の対数を取り, 縦軸は, 発生した応力 dyne/cm^2 をひずみ 0.002 で割った緩和弾性率 E_r の対数であらわして

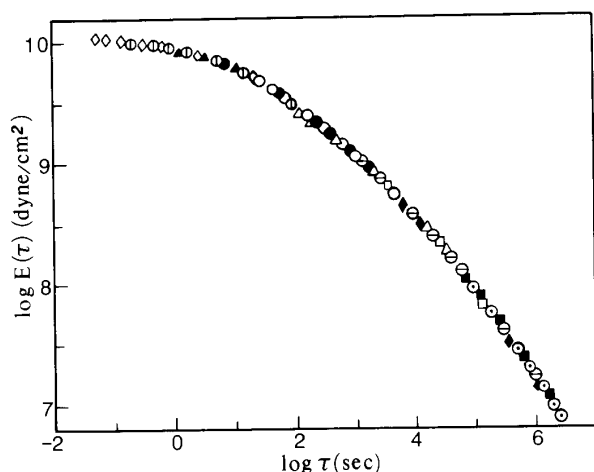


図7 パラフィンの応力緩和マスターカーブ（基準温度 20°C）

いる。ひずみが一定であるから E_r は応力に比例するので、縦軸は応力の対数と見てよい ($\log \text{応力} = \log E_r + \log 0.002$)。低温では E_r が大きく、その傾斜が小さい。つまり応力が緩和しにくい、高温になるに従って E_r が小さくなると共に緩和しやすくなっている。

高分子のことを考えるとき、非常に有力な手段があって、それが適用できると大変具合のよい法則がある。それを温度—時間換算則という。実際にそれをするには、この曲線を1本ずつ半透明のグラフ用紙に書いておき、グラフ用紙を低温のものは左に、高温のものは右に平行移動する。その曲線がぴたりと一致すれば温度—時間換算則が適用できたことになる。

つまり物体の変化が、低温のときは高速度映画を見るように、同じモードを保ちながら全体にゆっくりになる。高温になると、微速度映画を見るように、同じモードを保ちながら全体に素早い動きになれば、この法則を適用することができる。このような動きは熱力学的に単純なとき、いいかえれば物体内の種々の動きが、拡散速度に支配されるときにおこるものである。

図6について、上に述べたような操作をすると、図7のように一本の曲線になる。つまりパラフィンについては温度—時間換算則が見事に適用されたことになる。高分子ではよく適用されるが、パラフィンのように分子量数百という低分子で、この換算則が適用できたのは驚きであると同時に、大きな喜びであった。何故かといえば、応力緩和の実験でひずみを与えてから、例えば0.1秒後というような短時間の応力を測ることは難しいし、厳密な定温を保ちながら1日、10日という長時間にわたって応力を測ることも大変辛いことで

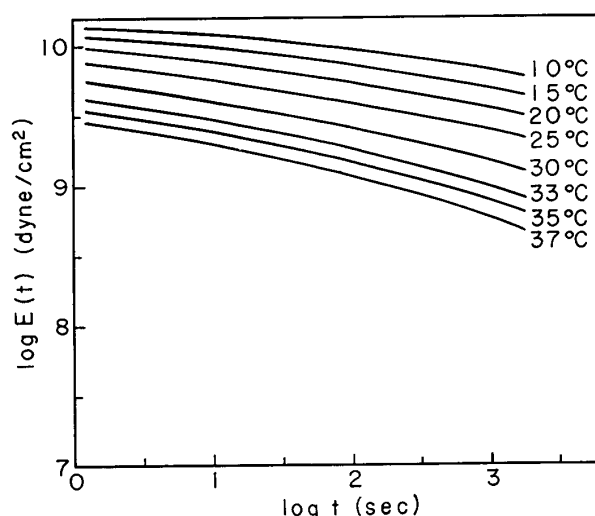


図8 松風ブルーインレーワックスの応力緩和の温度依存性

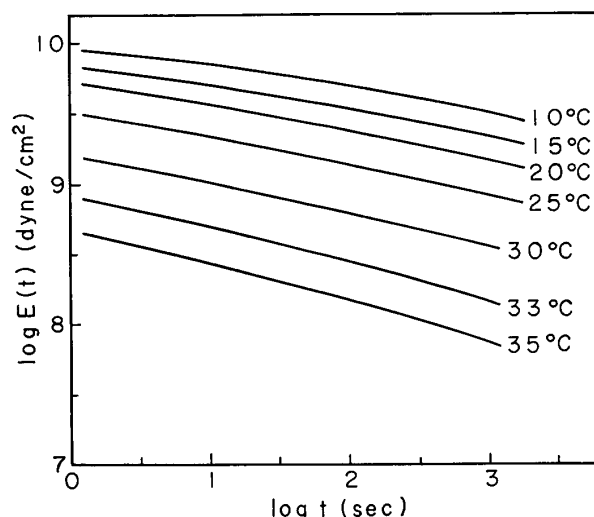


図9 東洋バイオレットインレーワックスの応力緩和の温度依存性

あるが、換算則が適用されれば、短時間から長時間までの応力が判るからである。この曲線のことを応力緩和のマスターカーブという。この図の横軸で左にたどる程、低温あるいは短時間の粘弾性的性質を知ることができるし、右にたどる程、高温あるいは長時間にわたる粘弾性的性質を知ることができる。このとき1°Cについて左右に動かした時間を換算係数 a_T といっている。

4. インレーワックスの応力緩和

図8は松風ブルー、図9は東洋バイオレットの応力緩和曲線であるが、添加物の影響でパラフィンより緩

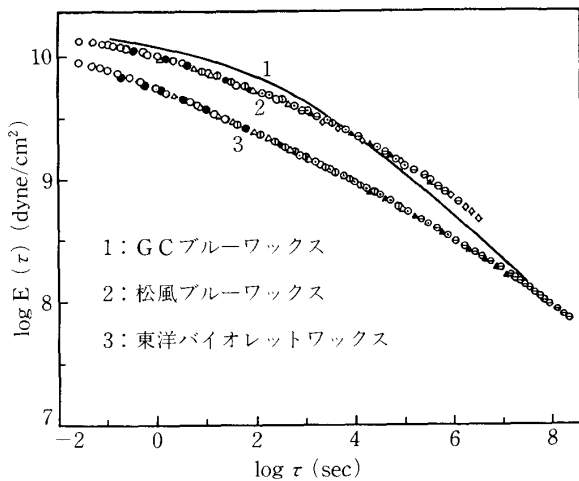


図10 インレーワックスの応力緩和マスターカーブ
(基準温度 20°C)

和しにくくなっている。

これを前と同様に時間—温度換算則に従って重ね合せをしたものが図10であるが、非常に重ね合せの良いマスターカーブが得られた。図中の実線は、他の論文で報告したGCブルーのマスターカーブである。材料によって違うが、 $10^6 \text{ sec} \div 9 \text{ 日間}$ から $10^8 \text{ sec} \div 3 \text{ 年間}$ 引張り続けたと同じ価値を持つ曲線が得られた。

ここでクラウンのパターンを思い出して頂きたい。このパターンは弾性限度も弾性率も高い歯型を抱えている。ワックスは冷却すると収縮するが、強い歯型に遮られて収縮できないために、ひずみが生じるので応力が発生する。応力とはひずみを受けた物体が、本来の形に戻るために貯えている力であるから、この応力が緩和してしまえば、直ちには本来の形に戻れない。いかえれば、本来収縮すべきパターンの内壁が収縮しないことになる。図10のGCブルーで1秒 ($\log \tau = 0$) のとき $\log E(\tau)$ は約10.1であるが約1日 ($\log \tau \div 5$) 経過すると $\log E(\tau)$ は約9.1となる。つまりその間に $E(\tau)$ は1/10に低下するので収縮も1/10になる。これを見ても1日程度歯型に付けたまま放置すれば、収縮は1桁程度小さくなることがわかる。

さらに応力緩和は、ワックスを歯型に圧接してから、常温に冷却するまでの間にも起る筈である。高温で柔らかいワックスについて、応力緩和の実験をするのは難しいので、数値解析をすることにした。

5. ワックス応力緩和の数値解析

ここで先ず Boltzmann の重畳の原理が適用できるものと仮定した。この原理を簡単に云えば、物体が次々

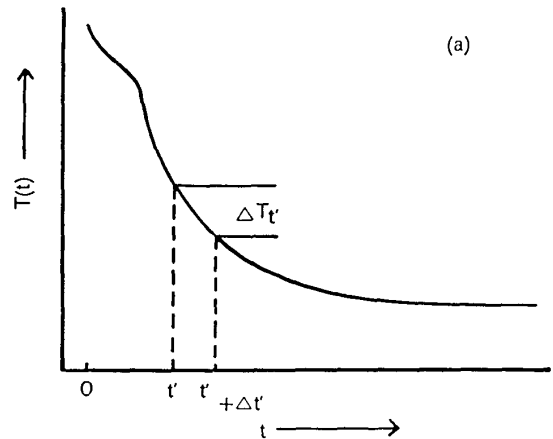


図11 ワックスの冷却曲線の模式図
 $T(t)$: 温度, t : 時間

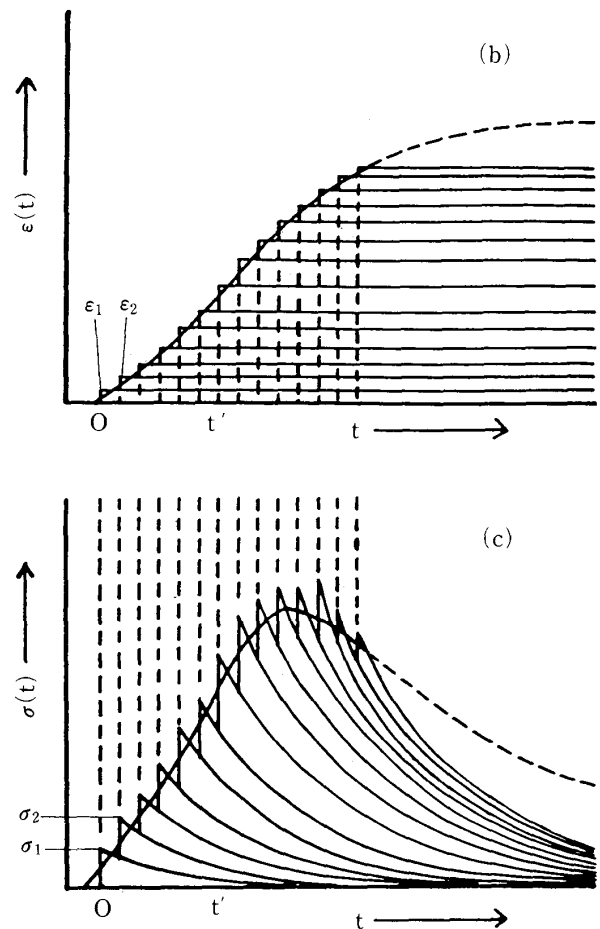


図12 熱応力の緩和についての模式図
(b) 熱収縮によるひずみ $\epsilon(t)$
(c) 冷却中の熱応力 $\sigma(t)$

にひずみを受け、それに応じて次々に応力が発生したとき、この応力やひずみは積み重ねるように加算することができるということである。

緩和弾性率 (dyne/cm²)

$$E(t) = 10^{\{10.095 - 0.1021 \log t - 0.02118 (\log t)^2\}}$$

温度—時間換算因子

$$a_T = 10^{\{2.571 - 0.0683 T - 3.367 \times 10^{-3} T^2\}}$$

熱膨張係数 (1/°C)

$$\alpha(T) = \{-0.4057 + 0.02568 T - 0.4324 \times 10^{-3} T^2\} \times 10^{-4}$$

冷却関数

$$T(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$$

$$T(t) = (T_0 - R.T.) \exp\{-b(t - t_0)\} + R.T.$$

t : 時間 (sec.) T : 温度 (°C) $R.T.$: 室温 (°C)

図 13 ワックスの物性値と冷却関数の 1 例

ワックスを収縮しないように止めて置き、図 11 のように横軸の時間軸で微小な時間 $\Delta t'$ の間に縦軸の温度が $\Delta T'$ だけ冷却したとすると、その温度におけるワックスの熱膨張係数に従って、図 12b のように ε_1 の熱ひずみが生じる。このひずみによってワックスには図 12c のように σ_1 の応力が発生する。この応力は時間 t とともに緩和するが、一方温度も時間とともに低下するので、刻々とその時の温度における緩和のモードに従って応力緩和してゆく筈である。そのために、時間を細かく区切って計算し、それを 1 回積分する。

次の微小時間で発生するひずみ ε_2 によって発生した応力 σ_2 も、前と同様に緩和してゆくのだから 1 回積分する。ここで応力の積み重ねが出来るとすれば、 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots$ で発生した応力 $\sigma_1, \sigma_2, \dots$ を全部加えれば全体の応力になるから、各積分値をもう一回積分すれば全体の応力の推移が判る筈である。

そのように考えて立てたのが次の式である。

$$\sigma(t) = \int_0^t E \left[\int_{t'}^t \frac{1}{a_T \{T(t'')\}} dt'' \right] \cdot \left[-\alpha \{T(t')\} \cdot \frac{dT(t')}{dt'} \right] dt'$$

この式に、種々の実験値から得られた図 13 のような実験式を入れ、図 14 の流れで計算した。

図 15 は短冊状の試験片を温めて、材料試験機に取り付けて放冷し、その時に発生する応力を測定したものと、その計算値である。下の図は試験片の冷却曲線、上の図の点線が応力の実測値、実線が計算値である。実線と点線は合っていないと云われるかもしれないが、全く応力が緩和しないと仮定すれば、これの数十倍の応力が発生する筈であるし、数値積分ではある程度の

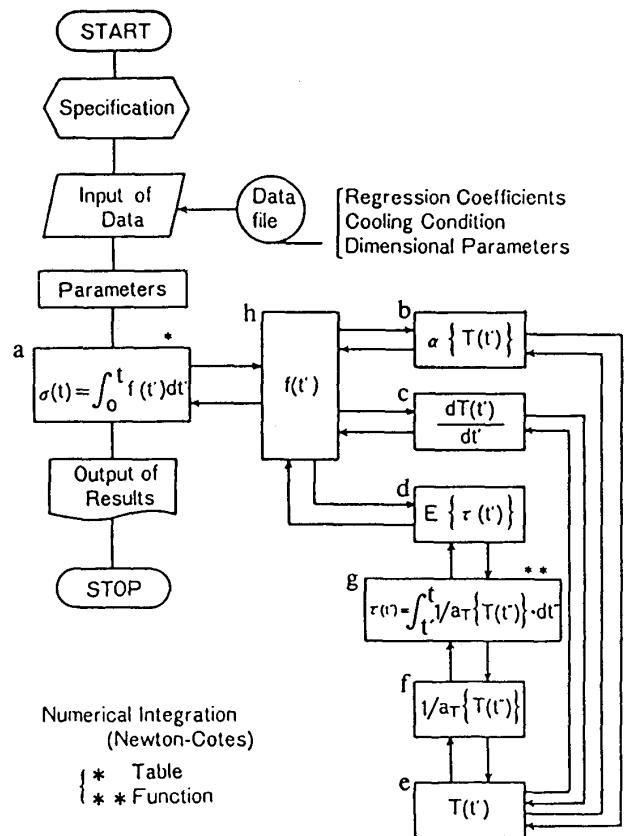


図 14 熱応力解析のフローチャート

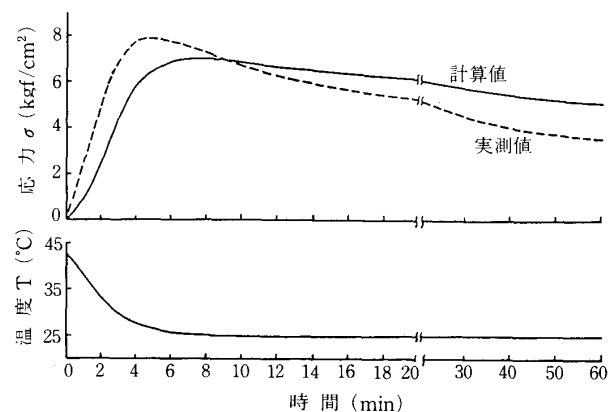


図 15 ワックスの冷却中に発生する応力の実測値と計算値

誤差は止むを得ないことであるから、私はこの両曲線は大変うまく合ったと思っている。1 時間後の応力は約 4 kgf/cm² であるが、それを常温での E_r で割れば収縮ひずみを求めることができ、約 0.03% となる。自由に収縮すれば 1% 以上であるから、この応力緩和によって、収縮はほぼ無視できるほどになると考えてよい。

次に仮想の冷却方法について計算したものが図 16

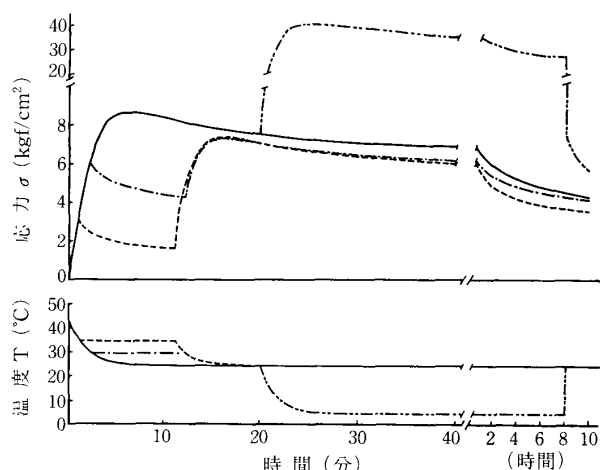


図16 ワックスの冷却方法（仮想）と熱応力
 —：指数関数，-----：35°Cで10分間保持
 ---：30°Cで10分間保持，-----：5°Cで8時間保持

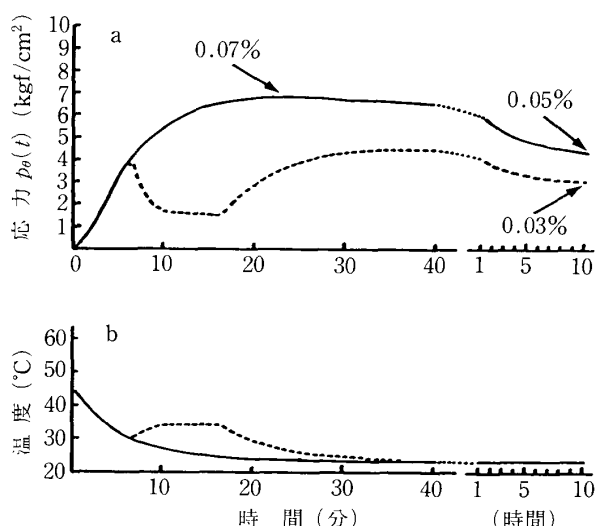


図17 a 圧接法における応力変化と収縮率，b 同温度変化
 実線：放冷，破線：彫刻

である。図の下の冷却曲線で冷却した時の応力が上の図である。また、ワックスパタンの冷却中に彫刻等の形成をすると、手の熱が伝導して温度が上がり、点線や一点鎖線のように応力が緩和する。手を離すと冷却するにしたがって再び応力が発生し、その後時間とともに少しずつ緩和する。

私は全部冠のパタンは冷蔵庫に入れて置いた方がよいと考えていた。何故なら、冷却すると大きな応力が発生するので、応力の緩和も大きいと考えたのであるが、2点鎖線に見られるように冷却すると発生する応

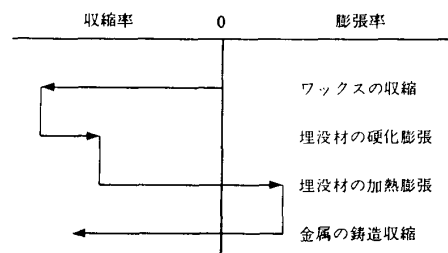


図18 内側性鑄造体用材料の寸法変化

力は大きくなるが、低温のためほとんど緩和しないので、この方法は効果がないことがわかった。

図17は実際にワックスを全部冠の形に圧接し、冷却させたり、パタンの形成をした時の温度変化を実測し、式に入れて計算したものであるが、形成によって残留応力が小さくなり、計算によれば収縮も0.5%から0.3%に減っている。

このようなことから、全部冠などのパタンを10時間も歯型に付けたまま置くと、ほとんど収縮は起らない。ただし、歯型から外して放置すると徐々に変型するから、歯型から取り外したら埋没は出来るだけ早くしなければならない。

鑄造体は大きく分けて3種類に分類することが出来るので、今まで述べてきたことをふまえ、実際に鑄造体について起っていることを模式的に図示して説明しよう。以下の図の横軸は、それぞれの材料の膨張収縮を量ではなく率で現してあることに注意して頂きたい。

6. 内側性鑄造体の適合

図18は単純な1級または5級のインレーについての模式図である。

この場合ワックスは自由に収縮し、続いて埋没材が硬化膨張し、加熱膨張する。鑄込まれた合金は、凝固した後収縮する。そして最終的には当然収縮しなければならない。

セメント層の厚さは、時と場合によって様々であるが、仮にセメント層を25 μm とすれば両側で50 μm となるから、例えば径5mmのインレーの場合には50 $\mu\text{m}/5\times10^3\mu\text{m}=1\%$ 、2.5mmの場合には2%収縮しなければ、インレーは浮き上るか、歯質が変形するか、歯が割れなければならない。

ワックスの収縮は、まず圧接法によって変り、浅い窩洞で強く圧接すると窩底まで内圧が高くなってワックスの収縮は小さくなってしまう。またワックスの融

点が低いほど収縮は小さくなってしまいます。この場合パタンの径が小さい時には、特にワックスの収縮を大きくした方がよい。

この場合ライニングをすれば硬化膨張と吸水膨張は自由に起る筈であるが、それにはライニング材の材質、ワセリンの塗布、埋没材の W/P などが複雑にからみ合うので、十分な注意が必要である。10 年程前、カオールというライニング材が開発され、そのままでは全く吸水しないとのことで、面白い材料が出たと思ったが、今のライニング材は全部吸水するようである。

埋没材の加熱膨張は、石英を使うかクリストバライトを使うかで変り、また W/P によっても変るが、今まで述べたことから判るように、クリストバライトを使う必要はない。鋳込まれた合金は、この場合凝固した後自由に収縮する。この収縮は、高融点合金ほど大きいのが普通である。

我々の若い頃は、ライニングもなく、クリストバライト埋没材もなかったが、1 級インレーはよく適合していた。

7. 外側性鑄造体の適合

図 19 は全部冠に代表される外側性鑄造体についての模式図である。前にも述べたように、この場合数時間、或いは一昼夜歯型に付けて置けばワックスの収縮はおこらない。次に埋没材が硬化膨張し、加熱膨張する。そして鋳込んだ合金は収縮する。

此の場合には最終的に膨張しなければならない。仮にクラウンの径が 10 mm とすると、 $50 \mu\text{m}/10^4 \mu\text{m} = 0.5\%$ 膨張しなければならないし、小さいクラウンで径が 5 mm とすれば、 $50 \mu\text{m}/5 \times 10^3 \mu\text{m} = 1\%$ 膨張しなければならない。

膨張しなければならない時にワックスは幸い収縮しない。次に埋没材が硬化膨張する。硬化膨張は埋没材が相当硬くなってから起るので、ワックスに妨げられずに膨張する。吸水膨張は、硬化の極めて初期に起るので、クラウンの外側は膨張しても、内側は膨張しない。次の加熱膨張は自由に起る。

高温の合金の物性を調べて見ると、合金の収縮は、一般の固溶体でせこう埋没材の場合には、全く埋没材に妨げられずに収縮する。ただし、冷却の途中に合金が変態するときは複雑である。変態点の処で柔かくなって収縮が小さくなる合金もあるが、場合によっては困ることもある。Au75%-Cu25% 合金試作品を鋳造後徐冷すると収縮は小さいが、Au-Cu の規則格子ので

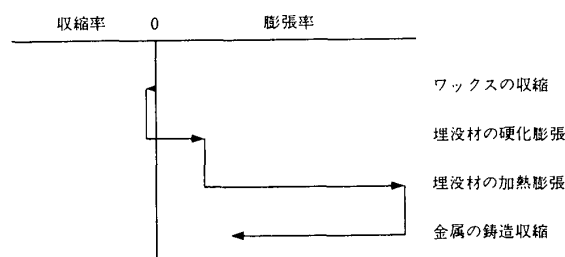


図 19 外側性鑄造体用材料の寸法変化



100 μm

図 20 Au75%-Cu25% 合金のマイクロクラック

きるときに大変もろくなるらしく、顕微鏡で見ると、図 20 のようなマイクロクラックが無数に出来ている。このようなことから、鋳造後ボタンが黒くなったなら水冷して、変態を起させない方が安全だと思っている。時効硬化のために鋳造後徐冷する人もいるが、急冷した後、一度溶体化加熱をして急冷し、改めて時効処理をした方がよい。時効に関する研究は最近少なくなったし、私共も最近他の方面に重要なことがあって止めてしまったが、その重要性は決して少なくなったのではない。特に近頃のように鑄造体が主流である時、特に貴金属合金では、弾性限を高くする時効処理は必須であると思っている。鋳造後急冷するとひずみが入るから徐冷すべきであるという論もある。金属やセラミックスをレオロジカルに見れば、マイクロ秒、ミリ秒の間で冷却するような時はともかく、水冷と空冷くらいの時間差は問題とするには当たらないと考えている。

20 世紀の初頭に現在の鑄造法が開発されて以来約半世紀、適合する鑄造体は前に述べた内側性鑄造体だけであった。適合する外側性鑄造体を作るために、我々の先輩は半世紀にわたって必死になって研究して来たのである。そして現在の「鑄造収縮補償理論」は、こ

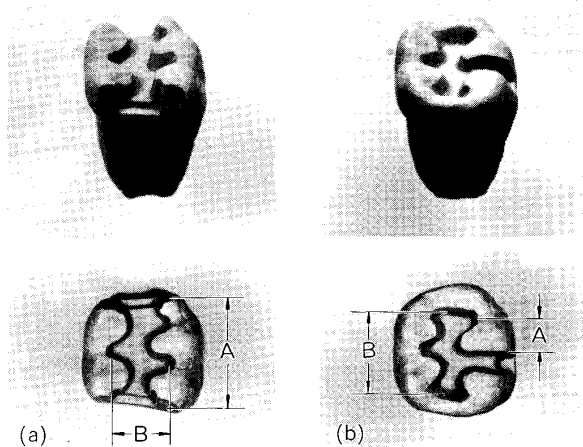


図 21 MOD 窩洞と複雑窩洞

の半世紀の苦闘の結晶であって、私共の頭に深く根をおろしている。つまりこの補償理論は本節で述べた外側鑄造体のために作られたもので、冠の鑄造は今や容易な技術になっている。

8. 両側性鑄造体の適合

図 21 左のような MOD インレーは、頬舌的には内側性、近遠心的には外側性である。また右図のように裂溝にそって拡大したインレーは、大部分は B で示した内側性であるが、一方 A で示したような外側性の処もある。このような鑄造体を両側性鑄造体と名付けることにする。ポストクラウン、3/4 冠、ピンレッジ、ワンピースブリッジなど、この種の鑄造体は意外に多い。

この場合図 22 の内側性の部分では、ワックスが冷却収縮し、埋没材は硬化膨張する。この型では、外側性部分のことを考えて、クリストバライト埋没材が使われるから加熱膨張は大きい。鑄込まれた合金は自由に収縮する。そして最終的には収縮させなければならない。前と同じに仮に $50\mu\text{m}$ 収縮させるためには、例えば巾 5mm の部分では 1% となる。次のような事を云うと、皆様いやな顔をされると思うが、太さ 1mm のポストでは計算上 5% の収縮をしなければ浮き上るか、歯質が押し上げられるか、歯が割れるかの何れかの道をとる。

図の外側性の部分では、ワックスの収縮は、ほぼ 0 にすることができる。次に埋没材は硬化膨張し、加熱膨張し、鑄込まれた合金は冷却収縮する。そして最終的には、前と同じように例えば 5mm の場合には 1% 、 10mm の場合には 0.5% 膨張させなければならない。

埋没材の硬化膨張は両者ともほぼ同じ筈であるが、

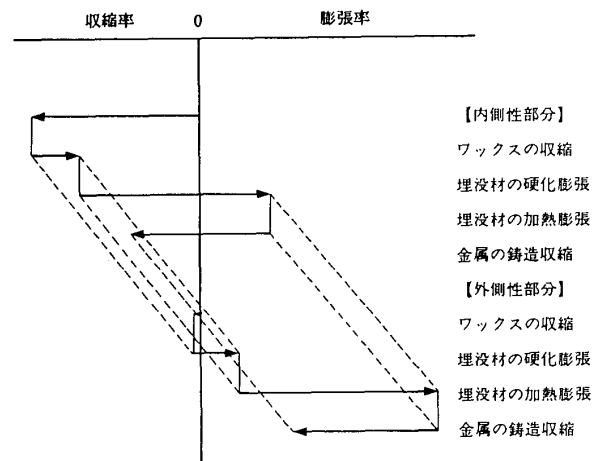


図 22 両側性鑄造体用材料の寸法変化

水和膨張の影響は全部冠の場合と違って複雑である。例えば MOD インレーの開脚現象などもその 1 つである。この場合、クリストバライト埋没材が使われるから、加熱膨張は大きくなる。次の合金の冷却には、厚さ、巾、埋没材と合金の高温強度の問題が複雑にからみ合う。

それらの結果として、外側性部分を、セメント層が確保できるだけ膨張させ、内側性部分もセメント層が確保できるだけ収縮させなければならない。そしてその役目の大部分を背負わされているのがワックスである。このように考えると、この種の鑄造体を適合させることは絶望的に難しいことがわかる。

MOD の咬合面など、幸いにしてあまり加圧が効かないが、さらに歯面側に欠陥のできない程度の圧接に止めて、できるだけワックスの収縮を大きくしておいた方がよい。ただそのために、ワックスの分離には十分な注意が必要である。ポストやピンを無闇と加圧する人もいるが、加圧しても入口の部分しか加圧が効かず、その下の部分で栓をしたようになって、幸いなことにワックスの収縮は十分に現れる。

易しそうで難しいのは図 21 右のような複雑なインレーである。これには、細い外側性部分があるのと同時に、頬舌方向に、細い内側性部分があるためである。

9. ポスト、ピン用ワックス

現在ワックスは、使い易さなどを中心として、パタンの形態に関係なく、自分の好みのワックス 1 種類が使われているようである。しかし、ポストやピンの部分では、操作性を犠牲にしても収縮の大きいワックスを、外側性部分には応力緩和しやすいワックスを、咬

表3 試作ワックスの組成 (wt%)

成 分 \ ワックス	S1	S2	S3	S4	S5	S6
パラフィン (HNP-1)	0	0	8	8	8	8
パラフィン (HNP-3)	0	85	56	48	48	50
パラフィン (64-66°C)	85	0	0	0	0	0
パラフィン (62-64°C)	0	0	0	8	6	8
パラフィン (58-60°C)	0	0	0	8	8	8
パラフィン (56-68°C)	0	0	16	8	8	8
カルナウバワックス	5	5	5	5	7	8
ダンマル	5	5	5	5	5	5
みつろう	5	5	10	10	10	5

合面には彫刻しやすいワックスを使ってもよいのではないかと考えている。

或る程度収縮の大きいワックスを作るとは可能である。表3は融点の高いパラフィンを使って作ったワックスである。これのS2は、前に述べた加圧短縮率50%から常温までの収縮率1.8%, S6は1.6%である。このようなワックスは彫刻がしにくいので、咬合面などには適しないが、ポストやピンの部分だけに使えば、多少の効果があるのではないかと考えている。また彫刻しにくくてもよいから、もっと収縮の大きいワックスが欲しいと云われれば、作るとは可能である。

ま と め

これまで述べて来たことから判るように、従来、困った材料だと云われて来たワックスは、鑄造体の適合に関しては非常に優れた性質を持っている。

この話を聞かれた方々の反応は恐らく次の3つに分れると思う。

- 1) そのようなことは十分判っていた。
- 2) そう云われて見れば、そうかな。
- 3) 鑄造はもっと複雑なもので、今の話など役に立たない。

この中で3)の方々は夫々の信ずる道を行って頂く他はないが、ただワックスは変態温度によっても圧接によっても収縮率が違い、また応力は緩和するという事実だけは認めて頂きたい。問題は2)の方々である。10日か20日経ってから実際に鑄造をする時には、ライニングをしないで鑄造するのは良心が咎めて駄目だ。ワックスパタンは力一杯圧接しつづけないと気が

済まない。石英埋没材を使うのは良心がゆるさない。矢張りクリストバライト埋没材を使おう、と云うことになると思う。これは我々の先輩が血の滲むような苦勞をして鑄造冠を作って来たことが、神話になって残っていて、それに背くことができないためである。

神話があると云って恥じることはない。自然科学の世界にも多くの神話がある。有機化学の分野には結晶神話がある。材料試験法にも鉄鋼神話があって、セラミックスやプラスチックの物性を見えにくくしている。

今アスベストの発癌性の問題から、ロックウール(セラミックスウール)のライニングに切り換って来て、臨床で多少の混乱が起っているようである。良い機会であるから、神話を忘れてもう一度、基礎に立ち帰って自分自身の理論を礎き上げて頂きたい。

膨張というと有益なもののように思われ、収縮というと有害なもののように思われている。まして変形といえば極悪人の扱いである。しかし我々は、「良く適合し、良く機能させるためには如何に変形させたらよいか」と考えるべきではなからうか。「一概に変形を恐れてはならない」。これを歯科材料のレオロジー、つまり変形と流動の研究を続けてきた私の最後の言葉としたい。

参 考 文 献

- 川上道夫：新歯科材料器械，医歯薬出版，113-115，1986
- 片倉直至，川上道夫：ワックスの変形に関するレオロジー的研究（第1報）パラフィンの応力緩和挙動および熱膨張。歯理工誌 **13**：188-193，1972。
- 片倉直至，川上道夫：ワックスの変形に関するレオロジー的研究（第2報）市販インレーワックスの応力緩和挙動。歯理工誌 **18**：118-123，1977。
- 川上道夫：最新の歯科技術，正確なワックスパタンを作るには，DE別冊63-83，1978。
- 片倉直至，川上道夫：インレーワックスの熱的性質と粘弾性挙動ならびにJIS規格試験の問題点。歯理工誌 **21**：288-296，1980。
- 荒木吉馬，他3名：ワックスパタンの熱応力と収縮に関する数値解析I. 緩和を伴う熱応力の解析法。歯材器 **2**：458-465，1983。
- 笠原 紳，他3名：ワックスパタンの熱応力と収縮に関する数値解析II. パタンの冷却条件と製作法の影響。東北歯誌 **2**：11-17，1983。

Naoyuki KATAKURA et al: Numerical Analysis of Thermal Stress and Shrinkage of Wax Patterns III. Effect of Physical Properties and Cooling Conditions. Dent Mater J **3**: 312-319, 1984.

Naoyuki KATAKURA., Michio KAWAKAMI:

Stress Relaxation Behavior of Binary Mixtures of Waxes. Dent Mater J **4**: 19-24, 1985.

片倉直至, 他 2 名: 複雑な鑄造体用インレーワックスの試作とその物理的性質。歯材器 **5**: 246-251, 1986.